

# 压裂酸化选井模糊综合评判方法\*

吴建发 郭建春 赵金洲

(西南石油学院研究生院, 四川成都 610500)

**摘要** 影响压裂酸化选井的因素很多,而且因素本身具有一定的模糊性,它们之间关系复杂。传统的选井方法依据经验,具有一定的主观性、盲目性。借助现代数学手段——模糊数学和系统工程层次分析原理,考虑到影响选井选层因素的复杂性和不均衡性,将各因素按其不同层次上对事物的影响程度分类,然后确定各因素最终的权重,形成一种压裂酸化选井选层的模糊综合评判方法。该方法计算结果正确,符合现场施工实际;计算简单、方便,具有一定的现场实用价值。

**关键词** 压裂 酸化 选井 模糊综合评判

压裂酸化要获得好的效果,首先要选取最合适的井,这样施工后才能获得增产,取得良好的经济效益。目前油田主要依靠经验来选择施工井层,具有一定的主观性,不能保证压后获得很好的增产效果。因此,有必要研究准确且现场工程师容易操作的压裂酸化选井选层的科学方法。

影响压裂酸化选井的因素众多<sup>[1]</sup>,关系复杂,各因素可能在不同层次上对压裂酸化效果起着不同的作用,且各因素本身具有模糊性,很难用常规方法量化研究。

针对目前使用方法的盲目性,借助模糊系统理论和系统工程层次分析原理,形成一种压裂酸化选井的模糊综合评判方法。压裂酸化选井影响因素层次如图 1 所示。

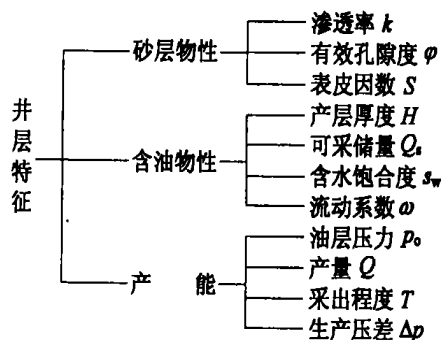


图 1 压裂酸化选井影响因素层次

## 1 模糊分析基本原理<sup>[2]</sup>

### 1.1 复合物元 R 的建立

待分类的事物称为样本,令 R 为 n 个样本的样本集,记为

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \quad (1)$$

每个样本都有 m 个特征,记为

$$r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\} \quad (2)$$

这样,样本集可用一个描述事物特征的模糊矩阵来确定,记为

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

### 1.2 效用函数的计算<sup>[3]</sup>

描述事物特征的物理量差异很大,但是在分类计算时,只需从数量上分析,必须消除物理量单位的干扰。因此,要利用效用函数的处理方法对描述事物的特征值规格化。本研究使用的处理方法如下。

(1) 越大越优型指标,其效用函数的计算为

$$b_{ij} = \frac{r_{ij} - (r_{ij})_{\min}}{(r_{ij})_{\max} - (r_{ij})_{\min}} \quad (4)$$

(2) 越小越优型指标,其效用函数的计算为

$$b_{ij} = 1 - \frac{r_{ij} - (r_{ij})_{\min}}{(r_{ij})_{\max} - (r_{ij})_{\min}} \quad (5)$$

式中,  $(r_{ij})_{\min}$  表示第 i 个特征中 n 个样本的最小值;  $(r_{ij})_{\max}$  表示第 i 个特征中 n 个样本的最大值。

由此可得效用函数矩阵 B

$$B = |b_{ij}|_{n \times m} \quad (6)$$

\* 基金项目: 国家技术研究发展计划“863 计划”(863-306-ZT04-03-3)成果中的一部分。

作者简介: 吴建发, 1976 年生。现攻读油气田开发博士学位, 研究方向为增产理论与措施。电话: 028-83030448。

## 2 层次分析基本原理<sup>[4]</sup>

本研究使用层次分析法求每层元素对上一层的权重。其原理是:用层次分析方法作系统分析,首先把问题层次化,形成一个多层次的分析结构模型。为将比较判断定量化,从此分析法引入1~9比率标度方法,构成判断矩阵,其含义如表1所示。

表1 层次分析标度

标度	含 义
1	两个因素相比,具有相同重要性
3	两个因素相比,一个比另一个稍微重要
5	两个因素相比,一个比另一个明显重要
7	两个因素相比,一个比另一个很重要
9	两个因素相比,一个比另一个极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较得到判断 $P_{ij}$ ,则因素 <i>j</i> 与 <i>i</i> 比较得到的判断为 $P_{ji} = 1/P_{ij}$

### 2.1 构造等价矩阵<sup>[5]</sup>

由于对比矩阵不一定满足判断一致性,为避免多次调整判断矩阵才能满足一致性要求,利用最优传递矩阵,对对比矩阵进行改良,使之自然满足一致性要求,建立等价矩阵,令

$$C_{ij} = \lg P_{ij} \quad (7)$$

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^N (C_{ik} - C_{jk}) / N \quad (8)$$

$$P_{ij}^* = 10^{d_{ij}} \quad (9)$$

以 $P^* = |P_{ij}^*|_{N \times N}$ 作为判断矩阵与 $P$ 完全等价,且具有判断一致性。

### 2.2 根据已经求得的等价矩阵用方根法求

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n P_{ij}^*} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

### 2.3 将 $W_i$ 规范化

$$W_i = \frac{W_i}{\sum_{k=1}^N W_k} \quad (11)$$

则 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 即该层各有关元素对上一层次的权重。

### 2.4 计算总权重<sup>[6]</sup>

若上一层有*m*个因素,其权重分别为 $a_1, a_2, \dots, a_m$ 本层次*n*个因素 $A_1, A_2, \dots, A_m$ 对于上层每个因素的相对权重为 $W_1^i, W_2^i, \dots, W_n^i$ ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),则本层每个因素的组合权重为

$$\sum_{i=1}^m a_i W_1^i, \sum_{i=1}^m a_i W_2^i, \dots, \sum_{i=1}^m a_i W_n^i \quad (12)$$

可如此一层一层自上而下求,直至底层所有因素权重均可求出。

## 3 模糊决策模型的建立

由上述求出的各指标的权重 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 和各指标的效用函数矩阵 $B$ ,则各方案的综合效用值为

$$E = E_i + E_i' \quad (13)$$

其中, $E_i = \sum_{j=1}^n W_j b_{ij}$ 为越大越优型指标的效用值,

$E_i' = 1 - \sum_{j=1}^n W_j b_{ij}$ 为越小越优型指标的效用值。

将综合效用值规格化,规格化值越大压裂酸化效果越好,故可依据 $E$ 值由大到小将待选对象排序,最后选出最优的对象。

## 4 实例分析

以某油田的6口井作为候选井。各井的特征数据如表2所示。

表2 6口井的特征数据

参 数	M <sub>1</sub> 井	M <sub>2</sub> 井	M <sub>3</sub> 井	M <sub>4</sub> 井	M <sub>5</sub> 井	M <sub>6</sub> 井
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.71	9.48	0.83	3.32	1.49	1.53
有效孔隙度/%	5.59	5.50	4.87	4.80	6.15	3.79
表皮因数	6.48	-0.76	11.35	9.31	2.01	7.71
产层厚度/m	6.98	24.20	6.50	11.45	20.13	18.30
可采储量/ $10^8 \text{ m}^3$	15.94	9.44	1.19	12.84	13.06	5.17
含水饱和度/%	23.83	17.10	20.34	27.04	25.18	15.30
流动系数/ $10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot (\text{mPa} \cdot \text{s})^{-1}$	397.77	871.71	150.63	683.38	352.49	388.04
油层压力/MPa	39.677	49.885	47.515	49.932	49.826	47.968
产量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	4.0	21.57	2.44	14.37	10.47	5.20
生产压差/MPa	8.910	9.93	12.0	7.028	15.065	9.335
采出程度/%	3.25	2.75	0.326	6.70	0.031	6.22

#### 4.1 依据表2各具体参数建立复合物元

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} 0.71 & 9.48 & 0.83 & 3.32 & 1.49 & 1.526 \\ 5.59 & 5.50 & 4.87 & 4.8 & 6.15 & 3.79 \\ 6.48 & -0.76 & 11.35 & 9.31 & 2.01 & 7.71 \\ 3.25 & 2.75 & 0.326 & 6.70 & 0.031 & 6.22 \\ 6.98 & 24.20 & 6.50 & 11.45 & 20.13 & 18.30 \\ 15.94 & 9.44 & 1.19 & 12.84 & 13.06 & 5.17 \\ 23.83 & 17.10 & 20.34 & 27.04 & 25.18 & 15.30 \\ 397.77 & 871.71 & 150.63 & 683.38 & 352.49 & 388.04 \\ 396.77 & 49.885 & 47.515 & 49.932 & 49.826 & 47.968 \\ 4.00 & 21.587 & 2.44 & 14.37 & 10.47 & 5.20 \\ 8.910 & 9.930 & 12.000 & 7.028 & 15.065 & 9.335 \end{bmatrix}$$

#### 4.2 指标归一化处理

根据公式(4)、(5)规格化数据参数,将各指标值处理成为(0,1)之间的值,为各项指标的计算提供基础。其中:数据越大越有利的参数为表皮因数、采出程度、产层厚度、可采储量、油层压力;数据越小越有利的参数为渗透率、有效孔隙度、含水饱和度、流动系数、产量、生产压差。

#### 4.3 确定效用函数矩阵

由公式(6)确定效用函数矩阵前5行为越大越有利的参数,后6行为越小越有利的参数。

$$B = \begin{bmatrix} 0.402 & 0 & 0 & 0.168 & 0.771 & 0.301 \\ 0.918 & 1 & 1 & 0.376 & 0.58 & 0.856 \\ 0.517 & 0.408 & 0.956 & 0 & 1 & 0.719 \\ 0.727 & 1 & 1 & 0.539 & 0.174 & 0.251 \\ 0.66 & 1 & 1 & 0.267 & 0.722 & 0.673 \\ 0 & 1 & 0.137 & 0.298 & 0.089 & 0.093 \\ 0.237 & 0.725 & 0.542 & 0.572 & 0 & 1 \\ 0 & 0.559 & 1 & 0.21 & 0.195 & 0.73 \\ 0.273 & 0.153 & 0.571 & 0 & 0.328 & 1 \\ 1 & 0.995 & 0.236 & 0 & 0.01 & 0.191 \\ 0.766 & 0.361 & 0.381 & 1 & 0 & 0.713 \end{bmatrix}$$

#### 4.4 指标权重的计算

应用层次分析原理,对各项指标进行对比打分,建立判断矩阵,运用公式(7)~(11)计算各层指标的权重,运用公式(12)计算每层指标的总权重,计算结果见表3。

运用公式(13),计算各井的模糊积分值,并且排序,结果见表4。

通过上述各井模糊积分值的计算结果,可得出各井压裂的效果依次为M<sub>5</sub>、M<sub>1</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>6</sub>、M<sub>4</sub>、M<sub>2</sub>。

M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>和M<sub>3</sub>井已经进行了压裂施工,其压后

表3 各层指标的权重及总权重

第1层指标	权重	第2层指标	权重	总权重
砂层物性	0.65	$k$	0.45	0.2925
		$\varphi$	0.2	0.13
		$S$	0.35	0.228
含油物性	0.10	$H$	0.35	0.04
		$Q_s$	0.15	0.02
		$s_w$	0.4	0.04
		$\omega$	0.1	0.01
产能	0.25	$p_o$	0.4	0.1
		$Q$	0.15	0.04
		$T$	0.4	0.1
		$\Delta p$	0.05	0.0125

表4 各井模糊积分值及排序

井号	模糊积分值	排序
M <sub>1</sub>	0.92	2
M <sub>2</sub>	0.60	6
M <sub>3</sub>	0.83	3
M <sub>4</sub>	0.72	5
M <sub>5</sub>	1	1
M <sub>6</sub>	0.80	4

效果<sup>[6]</sup>依次为M<sub>1</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>2</sub>,上述排序结果与之相吻合,这也证明本研究是科学的、正确的。

根据总排序结果,对待选井M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub>和M<sub>6</sub>,首选M<sub>5</sub>,次选M<sub>6</sub>。

## 5 结论

(1) 建立模糊综合评判方法,以模糊数学为基础,综合考虑各因素的影响,计算结果符合实际,是现场压裂酸化选井的实用有效方法。

(2) 靠经验确定各影响因素权重的方法具有主观性,而本研究使用的系统工程层次分析法科学可靠,计算结果更为客观、更符合实际。

# 重复压裂气井三维诱导应力场数学模型<sup>\*</sup>

刘 洪 易 俊 李文华

胡永全 赵金洲<sup>\*</sup>

(重庆石油高等专科学校, 重庆 400042) (西南石油学院, 四川成都 610015)

**摘要** 重复压裂新裂缝的重新定向分析是具有相当难度和应用价值的核心问题,也是制约重复压裂优化设计的关键。重复压裂产生的裂缝方向取决于地应力状态,垂直裂缝井重复压裂前储层中的应力分布,尤其是水平主应力方向控制着重复压裂裂缝的起裂方位和延伸方向。系统研究了垂直裂缝井重复压裂前应力场的分布特征及影响应力大小和方向变化的主要因素,在此基础上应用弹性力学、流固耦合、孔隙弹性理论等建立了重复压裂气井诱导应力场的数学模型,实现了垂直裂缝气井重复压裂前应力场的定量分析与模拟。

**关键词** 重复压裂 应力场 井间干扰 诱导应力 流固耦合

重复压裂技术是低渗透油气田开发中后期稳油控水的重要措施。处于高含水期开采阶段的井,由于老裂缝控制的原油已接近全部采出,必须实施改向重复压裂,在油气层中打开新的油气流通道,更大范围地沟通老裂缝未动用的油气层,大幅度增加油气产量,进一步提高油气藏开发效果<sup>[1]</sup>。

根据弹性力学理论和岩石破裂准则,裂缝总是沿垂直于最小水平主应力方向启裂,因此,重复压裂井中的应力场分布决定了新裂缝的启裂和延伸。影响重复压裂井应力场变化的因素很多,但对它们的研究并不深入,垂直裂缝井重复压裂前诱导应力的系统研究和相应模型并没有相关的报道,尤其是对邻井的生产/注入活动对重复压裂井应力场变化的影响研究很少。笔者建立的重复压裂井三维诱导应

力场数学模型,系统研究了影响垂直裂缝井重复压裂前应力变化的各种因素,包括:张开的初次人工裂缝产生的诱导应力<sup>[2]</sup>;初次人工裂缝产生后,油气井的生产活动将在井眼和初始裂缝周围的椭圆形区域内导致局部孔隙压力的重新分布产生了诱导应力,改变了重复压裂井周围的应力场分布,导致应力的方向和大小发生变化;邻井生产、注入过程中温度和孔隙压力变化引起的应力变化对重复压裂井应力变化的影响<sup>[3]</sup>等。应用弹性力学、断裂力学、流固耦合以及孔隙弹性理论等相关理论建立了相应的诱导应力求解的数学模型。

## 1 初次人工裂缝诱导应力模型

初次人工裂缝(见图 1)产生的诱导应力模型建

(3) 建立模糊综合评判方法不仅可用在压裂酸化选井,也适用于其他领域的评价和优选,用途非常广泛。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋廷学,田占良.模糊数学在压裂设计中的应用.天然气工业,1998,18(3),61~64
- [2] 刘育骥,耿新宇,肖辞源.石油工程模糊数学.四川成都:成都科技大学出版社,1994
- [3] 肖盛燮.模糊数学与工程应用.四川成都:成都科技大学出版社,1993

- [4] 王新纯,李彤,王秀臣.压裂系统工程.北京:石油工业出版社,2002
- [5] 唐庚,白璐.排水采气工艺方法优选的模糊决策研究.钻采工艺,2001,24(6):33~35
- [6] 肖芳淳.模糊分析设计在石油工业中的应用.北京:石油工业出版社,1993

(收稿日期 2003-11-27)

[编辑 付丽霞]

重点项目:“十五”国家重点科技攻关项目研究成果之一(No:2001BA605A-05-02-03)。

作者简介:刘洪,1972年生。现从事油气藏开采和增产技术等方面的科研教学工作,博士。电话:023-89092875。

<sup>\*</sup>胡永全、赵金洲分别为第2、第3作者。

active surface groups to the polymer and mixing oil-soluble viscosity-reducers with oil-soluble surface active agents or fluorinated surface active agents are the developing direction.

**Key words** viscous crude oil oil-soluble viscosity-reducers application review

### PERFORMANCE EVALUATION INDEXES AND MEASURES OF CROSS-LINKED POLYMER GEL FOR WATER SHUTOFF AND PROFILE CONTROL

by Tang Xiaofen (China University of Geosciences); Liu Yuzhang, Xiang wentao, Liu Gehui, Li Hongyan, Hu pin

**Abstract** Cross-linked polymer gel has unique structure and excellent performance, and due to this it has now most often been used in water shutoff and profile control in domestic and overseas oilfields. According to the differences on the polymer, cross-linking agents and addition agents, cross-linked polymer gel can be classified into many kinds. Though all kinds of gel have different structures, cross-linking ways and scopes of application, basic characters and evaluation indexes of them have no large difference. At present, performance evaluation measures of the gel are now more than 10 kinds and most of them are lack of practicability and scientificity. In the paper, systemic evaluation indexes and measures of performance for cross-linked polymer gel are established and polyacrylamide gel is used as benchmark. Quantitative indexes of agent dissolubility, gelation capacity and shutoff capacity in porous media are the emphasis of research.

**Key words** cross-linked polymer gel water shutoff agent profile control agent performance evaluation

### FUZZY COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD TO CHOOSE THE CANDIDATE WELLS FOR FRACTURING

by Wu Jianfa, Guo Jianchun, Zhao Jinzhou, (Southwest Petroleum Inst.)

**Abstract** To obtain good fracturing and acidizing treatment, it is important to select appropriate working wells. There are many factors that affect choosing the right working wells. The relation between them is very complicated and they possess definite fuzziness. The traditional methods of choosing the wells are based on experience, which possess definite subjectivity. With the aid of modern mathematical means: fuzzy mathematics and level analysis principle of systematic engineering, multi stage comprehensive

evaluation measure is formed for choosing the right wells of fracturing and acidizing. The result of this method is accurate and reliable and is accord with the practical effects. This method is simple and convenient. So it has a certain practical value.

**Key words** fracturing and acidizing choosing right wells fuzzy comprehensive evaluation

### MATHEMATICAL MODEL OF 3D INDUCED STRESS FIELD IN REFRACTURING GAS WELL

by Liu Hong (Chongqing Petroleum College); Hu yongquan, Zhaojinzhou, Yi Jun, Li Wenhua

**Abstract** The refracturing reorientation is fairly difficult and most important in refracturing. The refracture orientation depends on the stress field in the vertically-fractured well. The stress field, especially the horizontal principal stress orientation in the vertically-fractured well determines the azimuth of refracture creation and refracture propagation. The paper study systematically the stress characteristics of vertically-fractured gas well and the main factors affecting the change of stress value and the stress orientation. Using the theory of elasticity mechanics and fluid-solid coupling and poroelastic, we have set up the mathematical model of induced stress of refracturing gas well to quantitatively analyze and simulate stress field before refracturing for vertically-fractured gas well.

**Key words** refracturing stress field well interference induced stress fluid-solid coupling

### APPLICATION OF LARGE SCALE FRACTURING TECHNOLOGY TO RESERVOIR STIMULATION IN NO. 204 GAS WELL OF HONGTAI COMPACT GAS FIELD

by Liu Jianwei, Wang Yubin, Wang Shujun, Zhang Jianping, (Drilling & Production Technology Research Institute of Tuha Petroleum Headquarters)

**Abstract** Hongtai gas reservoir of Xiaochaohu sag is featured on low pressure & permeability and has no initial production, and conventional fracturing stimulations result poor effects. The large scale fracturing technology to reservoir stimulation is studied and supplied successfully in No. 204 well of hongtai field. It comprises some key technique about rational definition of fracture scale, optimal design of large scale fracture job and harmless flowback aiding hydraulic fluid. A total of 772.6 m<sup>3</sup> of hydraulic fluid and 100.6 m<sup>3</sup> of sand was injected in the well. The initial gas production adds up to 160 000 m<sup>3</sup>/d, and the stability gas production is 96 000 m<sup>3</sup>/d accompa-